

## МЕРИДИОНАЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛА В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

С.Б. Крашенинникова, А.Б. Полонский

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: svetlanabk@mail.ru

По данным гидрографических разрезов WOCE в окрестности 7.5°с.ш., 24.5°с.ш. и 36°с.ш. Северной Атлантики рассчитан меридиональный перенос тепла (МПТ) в океане и проведен критический анализ опубликованных оценок МПТ, полученных разными авторами с использованием прямых методов.

**Введение.** Океан играет существенную роль в динамике климатической системы. Он является основным источником влаги для атмосферы и непосредственно воздействует на теплообмен с ней, медленно охлаждается и медленно нагревается, имеет более плотную и вязкую структуру и отвечает за существенную долю меридионального переноса тепла (МПТ) в системе океан-атмосфера. В Субтропической Атлантике эта доля составляет по различным оценкам от 60 до 75%.

Принципиальной особенностью климатической системы является неравномерное распределение МПТ в Северной Атлантике. В соответствие со схемой циркуляции вод Мирового океана Стоммела [1], глобальная термохалинная циркуляционная ячейка главным образом формируется за счет конвекции холодных вод и образования глубинных вод в Северной Атлантике и компенсирующего переноса относительно теплых вод термоклина на север, что приводит к результирующему МПТ в Северной Атлантике, направленному с юга на север.

Поскольку низкочастотная изменчивость системы океан-атмосфера в значительной степени зависит от изменчивости интенсивности меридиональной циркуляции в Атлантическом океане, корректное моделирование глобального климата и его изменений требует точного знания средних величин МПТ в океане и тенденций их изменений в процессе наблюдаемого глобального потепления.

К настоящему времени выполнено несколько обобщенных оценок МПТ в Атлантическом океане. Они показывают, что кроссэкваториальный перенос тепла в Атлантике составляет порядка 1 ПВт ( $10^{15}$  ватт). МПТ достигает максимальной величины (около 1.5 ПВт) в Субтропической Атлантике. Однако между различными оценками существуют достаточно большие расхождения. С целью уточнения величин МПТ в настоящей работе использовался массив данных эксперимента WOCE и проводился критический анализ оценок МПТ, полученных с использованием прямых методов разными авторами.

Главное преимущество программы WOCE - высокоточные глубоководные наблюдения, проводимые от поверхности до дна океана. За период WOCE было выполнено более 20 тысяч станций, что позволило обеспечить хорошее пространственное разрешение на разрезах.

**Материалы и методика.** В настоящей работе по данным зональных разрезов WOCE в окрестности 7.5°с.ш. (A06), 24.5°с.ш. (A05, AR01A) и 36°с.ш. (A03), выполненных в 1992 – 1998 г.г., рассчитан МПТ в Северной Атлантике. Среднее расстояние между станциями на разрезах около 40 миль. Распределение данных во времени и количество станций на каждом разрезе приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сроки выполнения разрезов и количество станций на каждом из них

Название разреза	Широта	Период выполнения	Количество станций
A03	36° с.ш.	09.1993 – 10.1993	133
A05	24.5°с.ш.	07.1992 – 08.1992	113
AR01A	24.5°с.ш.	01.1998 – 02.1998	131
A06	7.5°с.ш.	02.1993 – 03.1993	83

Зондирования выполнялись STD комплексами от поверхности до дна океана. Данные температуры и солёности интерполировались линейно на равномерную по вертикали сетку с шагом 10 м до глубины 2000 м., которая принималась за нижнюю границу бароклинного слоя. В прибрежных частях разреза за нулевую поверхность

принималась глубина 500 м. Для расчета среднегодового МПТ в океане ( $\bar{H}$ ) через круг широты в общем случае применяется выражение (1):

$$\bar{H} = C_p \bar{\rho} \int_0^h \int_0^L VT dx dz \quad (1)$$

где  $h$  и  $L$  – глубина и ширина океана;  $C_p \bar{\rho} = 4.18 \frac{\text{Дж}}{\text{град} \cdot \text{см}^3}$ ;  $V$  и  $T$  – меридиональ-

ная компонента скорости и температуры воды, соответственно. Черта сверху означает осреднение по времени.

Квазистационарный среднегодовой перенос тепла связан со среднегодовой меридиональной циркуляцией, наличием корреляций между изменениями скорости и температуры на сезонном и синоптическом масштабах, а также различными корреляциями между сезонными и синоптическими флюктуациями. В соответствии с результатами, полученными нами ранее [2], главный вклад в МПТ в Северной Атлантике вносит средняя меридиональная циркуляция, корреляции между сезонными и синоптическими флюктуациями скорости и температуры невелики. Поэтому в настоящей работе мы будем в основном анализировать средний МПТ, а сезонные и синоптические флюктуации будут рассмотрены при обсуждении точности оценок квазистационарного МПТ. Разделив меридиональную скорость на сумму дрейфовой, бароклинной и баротропной скорости, среднегодовую меридиональную циркуляцию можно представить в виде:

$$\bar{H} = C_p \bar{\rho} \int_0^h \int_0^L (\bar{V}_{др} T^* + \bar{V}_{бк} T^* + \bar{V}_{бр} T^*) dx dz, \quad (2)$$

где  $\bar{V}_{др}$  – существенна в верхнем экмановском слое,  $\bar{V}_{бк}$  – в пределах главного термоклина,  $\bar{V}_{бр}$  – в глубинных слоях океана,  $T^* = \bar{T} - T_H$ ,  $T_H$  – глубинная температура в Атлантике.

Дрейфовые переносы оценивались по экмановским соотношениям с использованием касательного напряжения ветра, приведенного в стандартном информационном продукте WOCE с недельным разрешением [3]. Бароклинные скорости течений рассчитывались по геострофическим соотношениям.

Баротропный перенос оценивался с использованием закона сохранения массы.

Чтобы описать синоптические возмущения и оценить возможную погрешность, связанную с их недостаточным разрешением по гидрологическим данным, а также несинхронностью выполнения разреза применялась следующая методика. Для каждой станции на разрезе рассчитывались единичные интегральные переносы массы и тепла, которые затем интерполировались в узлы регулярной сетки. С помощью спектрального анализа, определялась длина волны и амплитуда синоптического возмущения для каждого разреза. Из дисперсионного соотношения для планетарных волн находилась период синоптического возмущения, и рассчитывалась фазовая скорость. Рассчитанные длины волн преобладающих синоптических возмущений, составляют 633 – 733 км. Фазовые скорости, изменяются в пределах 1.56 – 11.4 см/с. Поскольку фазовая скорость в рассматриваемой области Северной Атлантики (от 7.5 до 36° с.ш.) получилась много меньше скорости выполнения разреза, то погрешностью, связанной с несинхронностью наблюдений, можно пренебречь. Затем, зная длину разреза и длину волны синоптического возмущения, можно определить сколько целых длин волн синоптического возмущения укладывается на разрезе. Остаток же синоптического возмущения будет вносить некоторую погрешность в оценку суммарного МПТ. Было получено, что погрешности оценки интегральных МПТ за счет синоптических шумов малы и составляют от 1 до 4%. Основная погрешность при расчете квазистационарного МПТ по данным единичных разрезов обусловлена недостаточно хорошей фильтрацией сезонных вариаций МПТ. Поэтому кроме расчета МПТ по данным WOCE был проведен критический анализ опубликованных оценок МПТ, полученных разными авторами с использованием прямых методов (Таблица 2).

**Результаты.** В Субтропической Атлантике по данным разреза A05, выполненного в июле-августе 1992 года, был получен МПТ равный 1.25 ПВт. Этот результат близок к оценкам МПТ, опубликованным в работах [4,5]. Однако МПТ, полученный в настоящей работе по повторенному разрезу

AR01A, выполненному в январе-феврале 1998 года, значительно меньше и равен 0.85 ПВт.

Меридиональный перенос тепла, рассчитанный нами по данным разреза A03, выполненного в 1993 г. в окрестности 36°с.ш., оказался равным 1.3 ПВт., что соответствует оценке МПТ, полученной в работе Сато и Россби [6]. Оценки МПТ, опубликованные в работах [5] и [7], существенно меньше и равны 0,86 ПВт и 0,8 ПВт соответственно. Подробный анализ МПТ на 36°с.ш. был проведен в работе [6]. Используя данные наблюдений на разрезах за период около 60 лет, они исследовали сезонную изменчивость МПТ и рассчитали средний МПТ в Северной Атлантике на 36°с.ш. В результате суммарный океанический перенос тепла, оказался равным  $1.2 \pm 0.3$  ПВт и направлен на север. Размах амплитуды годового хода  $0.6 \pm 0.1$  ПВт. Максимум МПТ приходится на позднее лето, а минимум - на весну. Это свидетельствует о том, что оценки суммарного переноса тепла на 36° с.ш. сильно меняются от сезона к сезону. Можно также предположить, что данное утверждение справедливо для всех рассматриваемых широт.

Согласно нашим данным и анализу оценок МПТ, проведенному в работе Холл и Брайдена [4], можно заключить, что величина квазистационарного МПТ на 24.5° с.ш. изменяется от сезона к сезону в пределах от 0.85 до 1.3 ПВт при средней величине МПТ около  $1 \pm 0.15$  ПВт и амплитуде межгодовых вариаций порядка 10%.

В окрестности 7.5° с.ш. выполнено значительно меньше прямых оценок МПТ, чем в окрестности 24.5 и 36° с.ш. Тем не менее, следует обратить внимание, что оценка МПТ Тэлли (0.73 ПВт) [7] близка, к полученной в настоящей работе по данным стандартного разреза WOCE A06 (0.79 ПВт).

Анализ отдельных составляющих МПТ подтвердил, что дрейфовые переносы тепла убывают в рассматриваемой области широт в Северной Атлантике в направлении от тропиков к субтропикам в пределах от 0.87 ПВт почти до 0 (рис.2). Это связано с наличием интенсивных пассатов в Тропической Атлантике и западного переноса в атмосфере умеренных широт. Величины баротропных переносов тепла в Северной Тропической и Субтропической Атлантике доста-

точно устойчивы и изменяются в пределах от 0.4 до 0.5 ПВт. Баротропные переносы тепла в рассматриваемой области широт направлены на юг, в то время как бароклинные и дрейфовые переносы - на север.

Таблица 2 - Прямые оценки МПТ между 7.5 - 36°с.ш. Северной Атлантики по данным различных авторов

Широта	Авторы, годы публикаций	Н, ПВт
36°N	Тэлли, 2003	0,86
36°N	Роеммич, Вунш, 1985	0,8
36°N	Сато, Россби, 2000	$1,2 \pm 0,3$
36°N	Настоящие результаты	1,3
24.5°N	Холл, Брайден, 1982	$1,2 \pm 0,3$
24.5°N	Роеммич, Вунш, 1985	1,2
24.5°N	Настоящие результаты	1,25; 0,85
8°N	Тэлли, 2003	0,73
7.5°N	Настоящие результаты	0,79

Отметим, что отдельные компоненты МПТ, полученные различными авторами, могут сильно различаться, несмотря на то, что суммарный МПТ меняется незначительно. Так, например, в работе [4] бароклинный МПТ через 24.5° с.ш., оцененный по октябрьским данным, оказался отрицательным (-0.43 ПВт), а баротропный перенос (1.23 ПВт) - положительным, в то время как по нашим данным, бароклинный перенос равен (1.23 ПВт), а баротропный - (-0.4 ПВт). Однако суммарные величины МПТ, полученные нами и авторами работы [4], близки между собой.

**Выводы.** В результате выполненных расчетов и проведенного анализа можно заключить, следующее: МПТ достигает своего максимума в Субтропической Атлантике. Однако точно определить широту, на которой он находится нельзя, поскольку разница между оценками МПТ на различных широтах в Субтропической Атлантике статистически незначима (рис.1).

Суммарный МПТ в Субтропической Атлантике в основном определяется бароклинным переносом. В Тропической Атлантике дрейфовые переносы тепла вносят существенный вклад в интегральный МПТ, что обусловлено наличием интенсивных пассатных ветров в низких широтах. Погрешность оценки квазистационарного МПТ в Субтропической Атлантике, связанная с плохим разрешением сезонного хода, составляет около 10%. Погрешности оце-

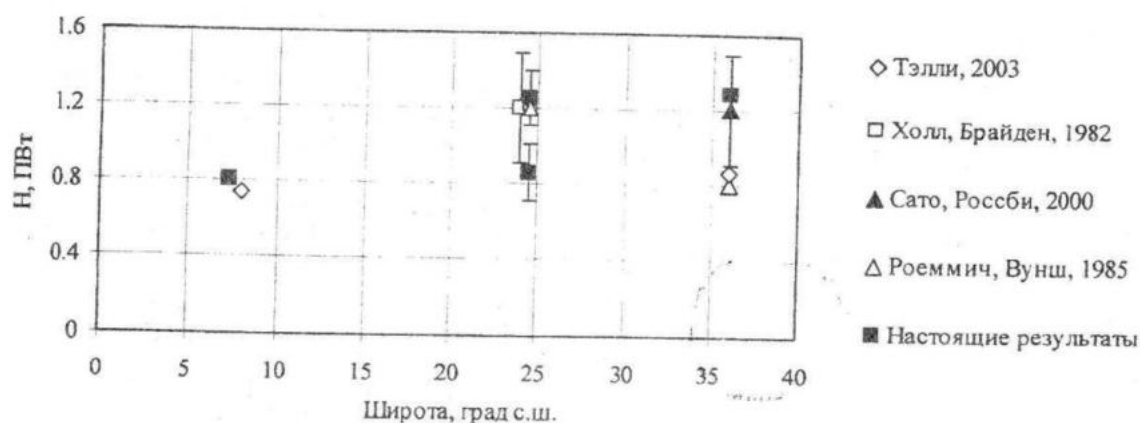


Рис. 1 – Суммарный меридиональный перенос тепла в Северной Атлантике. Значками обозначены оценки МПТ по данным разных авторов. Вертикальные тонкие линии обозначают доверительные интервалы ( $\pm\sigma$ )

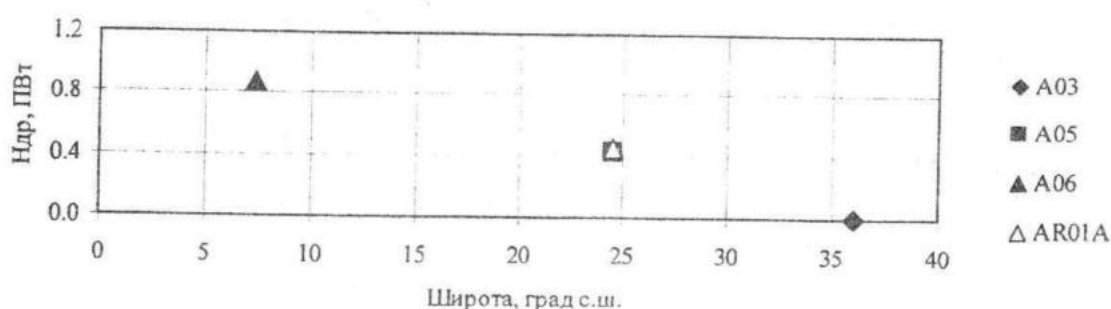


Рис. 2 – Дрейфовый меридиональный перенос тепла в Северной Атлантике по данным WOCE. Значками обозначены оценки дрейфовых переносов тепла на четырех разрезах WOCE

нок интегральных МПТ за счет синоптических флюктуаций не превышают 4%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стоммел Г. Обзор теории морских течений. – В кн.: Проблемы океанической циркуляции. – М.: Мир, 1965. – С. 5–14.

2. Крашенинникова С.Б. Оценка океанического меридионального переноса тепла в Субтропической Атлантике // Сб. тр. научн. конференции «Ломоносовские чтения-2005»: НПЦ «ЭКОСИ - Гидрофизика», 2005. – С. 25.

3. WOCE Global Data. Version 3.0 2002. WOCE International Project Office // WOCE Report No.180/02 Southampton, UK.

4. Hall M.M. and Bryden H.L. Direct estimates and mechanisms of ocean heat transport // Deep-Sea Research, 1982. – v.29, №3A, – С. 339–359.

5. Roemmich D. Wunsch C. Two transatlantic sections: meridional circulation and heat flux in the subtropical North Atlantic Ocean // Deep-sea Research, 1985. – v.32, №6A, – С. 619–664.

6. Sato O.T. and Rossby H.T. Seasonal and Low-Frequency Variability of the Meridional Heat Flux at 36° N in the North Atlantic // Journal of Physical Oceanography, 2000. – v.30, №3, – С. 606–621.

7. Talley L.D. Shallow, Intermediate, and Deep Overturning Components of the Global Heat Budget // Journal of Physical Oceanography, 2003. – v.33, – С. 530–560.